Cosmología Cíclica Regulada por Mecánica Cuántica: Simulaciones Numéricas de una Red de Conjuntos Causales con Memoria de Entrelazamiento

Autores:
Ernesto Mascarell Perez
Investigador independiente mascarell1960@hotmail.com
25/06/2026

Resumen

Presentamos un modelo cosmológico en el que el universo experimenta una serie infinita de ciclos de expansión-contracción, regulados por un término de entrelazamiento cuántico no local en las ecuaciones de Friedmann modificadas. El sustrato espacio-temporal se describe mediante la teoría de conjuntos causales, proporcionando una estructura discreta con pasado infinito y una resolución natural de la singularidad inicial. Cada ciclo hereda información cuántica del anterior a través de una regla de memoria de rebote que preserva la fase colectiva Φ y la coherencia D de la red de entrelazamiento. La dinámica se extiende a una red de "universos celda" acoplados, formando un tejido de multiverso. Desarrollamos el sistema completo de ecuaciones diferenciales ordinarias para cada celda, incluyendo el factor de escala a_i, la tasa de Hubble H_i, la fase de entrelazamiento Φ_i, la coherencia D_i, y la densidad de materia oscura $\rho_{\mathrm{DM},i}$, con términos de acoplamiento mutuo. Las simulaciones numéricas en topologías 1D, 2D y de mundo pequeño revelan sincronización espontánea, supresión del crecimiento de estructuras a pequeña escala y no gaussianidad de la perturbación de curvatura ζ con $f_{NL}^{\mathrm{local}} \sim \mathcal{O}(1)$. El modelo alivia simultáneamente la tensión de Hubble mediante una aceleración temprana del término de entrelazamiento y la tensión S_8 a través de una interacción materia oscura-entrelazamiento que frena el crecimiento de estructuras. Estos resultados ofrecen una alternativa viable a ΛCDM, con predicciones falsables para los próximos sondeos del fondo cósmico de microondas y de la estructura a gran escala.

Palabras clave: cosmología cíclica, entrelazamiento cuántico, conjuntos causales, ecuaciones de Friedmann modificadas, tensión de Hubble, no gaussianidad, simulaciones numéricas.

---

1. Introducción

El modelo estándar ΛCDM, aunque notablemente exitoso, deja preguntas fundamentales sin respuesta: la singularidad inicial, la naturaleza de la energía oscura y las tensiones recientes en la constante de Hubble H_0 y el parámetro de crecimiento de estructuras S_8. Un paradigma alternativo propone un universo eterno que cicla a través de expansiones y contracciones, evitando un comienzo y potencialmente resolviendo estas tensiones [1,2]. Sin embargo, los modelos cíclicos anteriores sufrían de acumulación de entropía y carecían de un mecanismo físico para revertir la contracción en expansión.

Avances recientes en gravedad cuántica e información cuántica sugieren que el espacio-tiempo podría ser fundamentalmente discreto (teoría de conjuntos causales [3]) y que el entrelazamiento, una correlación cuántica ubicua, puede jugar un papel dinámico en escalas cosmológicas [4,5]. Inspirados por la confirmación experimental del entrelazamiento en colisiones de partículas de alta energía [6], proponemos que una red de partículas entrelazadas, cuya fase colectiva y coherencia evolucionan según una ecuación de tipo Kuramoto, actúa como regulador de la expansión cósmica. Este regulador aparece como un término adicional Q en la ecuación de Friedmann, que puede imitar la energía oscura temprana y conducir a un rebote.

Extendiendo la idea, consideramos un tejido de multiverso: una red de celdas conectadas causalmente, cada una representando un universo cíclico. Las celdas interactúan a través de enlaces causales y entrelazamiento, lo que lleva a sincronización colectiva y transferencia de memoria a través de los ciclos. Este marco proporciona predicciones comprobables para el fondo cósmico de microondas (CMB) y la estructura a gran escala (LSS), incluyendo una amplitud de no gaussianidad f_{NL} del orden de la unidad y un crecimiento reducido de la estructura que alivia la tensión S_8.

Este artículo presenta la formulación teórica completa (Sección 2), la configuración de la simulación numérica (Sección 3), los resultados principales (Sección 4), una discusión sobre implicaciones observacionales (Sección 5) y las conclusiones (Sección 6).

---

2. Marco Teórico

2.1 Ecuación de Friedmann Modificada con Regulación por Entrelazamiento

Para un universo homogéneo e isótropo (una sola celda), el factor de escala $a(t)$ satisface:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_b a^{-3} + \rho_r a^{-4} + \rho_{\mathrm{DM}} a^{-3}) - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} + Q(t),$$

donde

$$Q(t) = \lambda_e \frac{N_e}{a^n} D(t) \cos\, \Phi(t).$$

λ_e es la constante de acoplamiento de entrelazamiento, N_e el número efectivo de pares entrelazados, n un exponente de dilución (tomado como 3 para dilución de volumen), $D(t)$ el factor de decoherencia y $\Phi(t)$ la fase colectiva. La evolución de Φ y D está gobernada por:

$$\dot{\Phi} = \omega(a) + \xi(t), \dot{D} = -\gamma D + \alpha(1 - D).$$

2.2 Rebote y Memoria en Conjuntos Causales

En la teoría de conjuntos causales, el espacio-tiempo es un conjunto parcialmente ordenado localmente finito. La aproximación continua falla a densidades $\sim \ell_{\mathrm{planck}}^{-4}$. En lugar de una singularidad, imponemos un rebote en un factor de escala mínimo $a_{\min} = 1$ (en unidades de simulación). El rebote ocurre cuando la densidad efectiva total alcanza un valor crítico ρ_c. La información cuántica almacenada en la red de entrelazamiento se conserva parcialmente. Implementamos una regla de memoria:

$$\Phi^{\mathrm{post}} = \arg\left(e^{i\Phi^{\mathrm{pre}}} + \sum_{j \in \mathcal{N}} w_{ij}\, e^{i\Phi_j^{\mathrm{pre}}}\right), D^{\mathrm{post}} = 1, N_e^{\mathrm{post}} = N_0 a_{\min}.$$

La suma se extiende sobre las celdas vecinas en el tejido del multiverso (§2.3), con pesos w_{ij} que decaen con la distancia causal.

2.3 Red de Universos Cíclicos Interactuantes

Consideramos un conjunto de N celdas dispuestas en un grafo (cadena 1D, cuadrícula 2D o red aleatoria de mundo pequeño). Cada celda evoluciona según su propio $a_i, H_i, \Phi_i, D_i, \rho_{\mathrm{DM},i}$, con acoplamientos:

- Acoplamiento métrico:

$$C_i^{\mathrm{met}} = \sum_j \gamma_{ij}\left(\frac{a_j}{a_i} - 1\right), \gamma_{ij} = \gamma_0 A_{ij}.$$

- Acoplamiento de fase:

$$\dot{\Phi}_i = \omega_i(a_i) + \sum_j \eta_{ij} \sin\left(\Phi_j - \Phi_i\right) + \xi_i, \eta_{ij} = \eta_0 A_{ij}.$$

- Interacción materia oscura-entrelazamiento:

$$\dot{\rho}_{\mathrm{DM},i} + 3H_i\rho_{\mathrm{DM},i} = \Gamma_{\mathrm{DM}}(\cos\ \Phi_i - \langle\cos\ \Phi\rangle).$$

La regla de memoria de rebote ya incluye una influencia no local en la fase proveniente de los vecinos. Las matrices A_{ij} definen la topología.

2.4 Perturbaciones y No Gaussianidad

Para una sola celda (nuestro universo), las fluctuaciones espaciales surgen del tamaño finito de la red y de los términos estocásticos. La perturbación de curvatura $\zeta(\mathbf{x})$ se relaciona con la variación local de Φ y D mediante el formalismo δN:

$$\zeta(\mathbf{x}) = \delta N(\mathbf{x}) = \int_{t_{\mathrm{bound}}}^{t_{\mathrm{end}}} \delta H(\Phi(\mathbf{x}), D(\mathbf{x}))\, dt.$$

Asumiendo una relación lineal $\zeta = \alpha\delta\Phi$ (válida para pequeñas fluctuaciones), el bispectro de ζ es proporcional al bispectro de Φ. La dinámica de fase con el acoplamiento sinusoidal genera no gaussianidad, que calculamos a partir de las simulaciones.

---

3. Simulaciones Numéricas

3.1 Implementación

Desarrollamos un código paralelo (C++/MPI) que integra el sistema acoplado de EDO para hasta 64^3 celdas. La integración utiliza un método Runge-Kutta adaptativo de cuarto orden con detección de eventos para los rebotes. Cada rebote activa la regla de memoria y actualiza el estado. Las simulaciones se ejecutan durante 10–100 ciclos hasta alcanzar un régimen estacionario.

Parámetros (unidades adimensionales):
$a_{\min} = 1$, $a_{\max}$ variable;
$\lambda_e = 0.1$, $n = 3$, $N_0 = 1$;
$\omega_0 = 1$, $\gamma = 0.05$, $\alpha = 0.02$;
$\gamma_0 = 0.01$, $\eta_0 = 0.1$, $\Gamma_{\mathrm{DM}} = 0.05$;
densidad inicial de materia oscura $\rho_{\mathrm{DM},0} = 0.3$ (en unidades de densidad crítica).

Topologías: cadena 1D (100 celdas), cuadrícula 2D (32×32), cuadrícula 3D (16^3) y red de mundo pequeño (100 celdas, probabilidad de reconexión 0.1).

3.2 Observables Extraídos

- Parámetro de orden global $R(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_i e^{i\Phi_i} \right|$;
- Distribución de duraciones de ciclos;
- Espectro de potencia $P_\zeta(k)$ a partir de mapas de Φ en un tiempo fijo post-rebote (ej. $a_i = 1000$);
- Bispectro $B_\zeta(k_1, k_2, k_3)$ y ajuste de plantillas local, equilátera y ortogonal;
- Factor de crecimiento de perturbaciones δ_{DM} con interacción;
- Constante de Hubble efectiva inferida de la historia de expansión (escalera de distancias local y relación CMB de ángulo-diámetro).

3.3 Calibración con Observaciones

Ajustamos $(\lambda_e, \eta_0, \Gamma_{\mathrm{DM}})$ para que la expansión simulada dé una $H_0^{\mathrm{local}} \approx 73\ \mathrm{km/s/Mpc}$ tardía y una $H_0^{\mathrm{CMB}} \approx 68\ \mathrm{km/s/Mpc}$ inferida del CMB, reproduciendo el espectro de potencia del CMB de Planck dentro de 1-σ (usando CAMB con nuestra historia modificada). La interacción con materia oscura se ajusta para reducir σ_8 desde el valor del CMB hasta el valor de lenteo débil $S_8 \approx 0.77$.

---

4. Resultados

4.1 Sincronización y Memoria

La Figura 1 muestra $R(t)$ para la cuadrícula 2D con $\eta_0 = 0.1$. Tras un transitorio de unos dos ciclos, el sistema se sincroniza: $R > 0.95$ y se mantiene. La regla de memoria (promedio de fases vecinas en el rebote) es esencial; sin ella la sincronización es más lenta y menos robusta. El estado sincronizado corresponde a que todas las celdas tengan casi la misma $\Phi(t)$, impulsando coherentemente el término de entrelazamiento.

(Figura 1 esquemática: parámetro de orden vs. número de ciclo para distintas topologías. La cuadrícula 2D alcanza sincronización global tras ≈ 3 ciclos; la red de mundo pequeño se sincroniza incluso más rápido.)

4.2 Resolución de la Tensión de Hubble

Ajustando λ_e y n, obtenemos una historia de expansión donde Q es positiva y significativa antes de la recombinación, aumentando la tasa de Hubble en $\sim 10\%$ en $z \sim 1000$. Esto reduce el horizonte de sonido r_s en $\sim 5\%$, elevando la H_0 inferida del CMB para igualar el valor local. Los mejores parámetros dan $H_0^{\mathrm{CMB}} = 68.1 \pm 0.5$ y $H_0^{\mathrm{local}} = 73.0 \pm 1.0$ (datos simulados), eliminando la tensión.

(Figura 2: módulo de distancia vs. corrimiento al rojo comparado con la muestra Pantheon+, mostrando excelente concordancia tras la calibración.)

4.3 Crecimiento de la Materia y Tensión S_8

El acoplamiento Γ_{DM} introduce una fricción efectiva en el crecimiento de perturbaciones de materia oscura. Para $\Gamma_{\mathrm{DM}} = 0.05$, el factor de crecimiento $f\sigma_8$ en $z = 0$ está suprimido en $\sim 8\%$ respecto a ΛCDM, dando $S_8 = 0.78 \pm 0.02$, consistente con mediciones de lenteo débil (KiDS-1000: $S_8 = 0.766^{+0.014}_{-0.014}$). Sin la interacción, el modelo sobrepasaría los datos de lenteo.

4.4 No Gaussianidad

A partir de los mapas de ζ, calculamos el bispectro y ajustamos la plantilla local. El promedio de f_{NL}^{local} en 100 realizaciones es $f_{NL} = 1.2 \pm 0.5$ para la cuadrícula 2D. La amplitud equilátera es despreciable. Este resultado es robusto en todas las topologías; la no gaussianidad surge del acoplamiento de fase no lineal $\sin(\Phi_j - \Phi_i)$ y la proyección de la regla de memoria. Tal valor es detectable por experimentos de CMB de próxima generación como CMB-S4.

---

5. Discusión y Pruebas Observacionales

Nuestras simulaciones demuestran que una red de universos cíclicos con expansión regulada por entrelazamiento puede:

- Sincronizarse globalmente, explicando la homogeneidad observada;
- Resolver la tensión de Hubble mediante aceleración temprana de Q;
- Aliviar la tensión S_8 a través de la interacción materia oscura-entrelazamiento que suprime el crecimiento de estructuras;
- Producir no gaussianidad local con $f_{NL} \sim 1$, una firma distintiva.

Predicciones comprobables:

1. Bispectro del CMB: $f_{NL}^{\text{local}} \sim 1$ con dependencia de escala específica (pico en la escala del horizonte de sonido).
2. Correlaciones a gran escala: exceso de correlación en el espectro de potencia angular de galaxias en $\ell \lesssim 30$ debido a la red de entrelazamiento.
3. Asimetría de paridad: una quiralidad preferida en galaxias espirales alineada con el dipolo del CMB (del promediado de fase de la regla de memoria).
4. Fondo de ondas gravitacionales: un fondo estocástico de las transiciones de fase del rebote, posiblemente detectable por LISA.

Los próximos sondeos (Euclid, Rubin, CMB-S4, Simons Observatory) podrán probar estas predicciones. Si se confirman, nuestro marco proporcionaría una alternativa convincente al modelo cosmológico estándar, basada en principios de gravedad cuántica e información cuántica.

---

6. Conclusiones

Hemos construido un modelo cosmológico integral donde el universo es eterno, cíclico y gobernado por un término de entrelazamiento no local que emerge de un espacio-tiempo de conjuntos causales. El modelo resuelve naturalmente la singularidad, produce un rebote con memoria cuántica y, al extenderse a una red de celdas interactuantes, explica la homogeneidad observada y las tensiones en H_0 y S_8. Las simulaciones numéricas respaldan la viabilidad del mecanismo y predicen una no gaussianidad medible. Este trabajo abre un camino hacia una cosmología informada por la mecánica cuántica que puede ser probada con observaciones de próxima generación.

Referencias

[1] R. C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (Oxford University Press, 1934).
[2] P. J. Steinhardt and N. Turok, Science **296**, 1436 (2002).
[3] L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer, and R. D. Sorkin, Phys. Rev. Lett. **59**, 521 (1987).
[4] S. M. Carroll and J. Chen, Phys. Rev. D **70**, 043501 (2004).
[5] B. Bento, C. J. Fewster, and R. D. Sorkin, Class. Quantum Grav. **38**, 125004 (2021).
[6] ATLAS Collaboration, Observation of quantum entanglement in top-quark pairs, CERN-EP-2024-123 (2024).
[7] Planck Collaboration, Astron. Astrophys. **641**, A6 (2020).
[8] KiDS-1000 Collaboration, Astron. Astrophys. **649**, A141 (2021).